

铁纳米粒子/碳纤维/环氧树脂基复合材料的
制备和吸波性能*

王永辉 赛义德 黄昊 薛方红 张黎 董星龙

(大连理工大学材料科学与工程学院 三束材料改性教育部重点实验室 大连 116024)

摘要 用直流电弧等离子体法制备Fe纳米粒子, 用作微波吸收剂。用 γ -氨丙基三乙氧基硅烷(KH550)对Fe纳米粒子的表面改性, 然后按不同比例与环氧树脂均匀混合。在混合物中添加碳纤维后制备出Fe纳米粒子/碳纤维/环氧树脂基功能/结构一体化吸波复合材料, 研究了吸收剂的添加量和浓度梯度、碳纤维以及平板结构等因素对其在2-18 GHz范围内吸波性能的影响。结果表明, 碳纤维促进了结构体内电磁波的多重反射与吸收, 在低频段出现反射损耗峰并提高吸波性能; 随着Fe纳米粒子含量的提高吸波能力逐渐增强, 吸收峰向低频移动; 在环氧树脂的固化过程重力导致Fe纳米粒子浓度呈梯度分布, 使平板状复合材料正、反两面的吸波性能出现差异, 吸收剂浓度的梯度分布有利于电磁波的进入和吸收。

关键词 复合材料, 反射损耗, Fe纳米粒子, 碳纤维

分类号 TB333

文章编号 1005-3093(2015)02-0081-07

Fabrication and Electromagnetic Microwave Absorbing
Properties of Fe-Nanoparticles/Carbon Fibers/Epoxy
Resin Based Composites

WANG Yonghui Asif Shah HUANG Hao XUE Fanghong ZHANG Li DONG Xinglong**

(Key Laboratory of Materials Modification by Laser, Ion, and Electron Beams, Ministry of Education; School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

*Supported by National Natural Science Foundation of China Nos. 51271044, 51331006 & 51171033.

Manuscript received July 11, 2014; in revised form September 22, 2014.

**To whom correspondence should be addressed, Tel: (0411)84706130, E-mail: dongxl@dlut.edu.cn

ABSTRACT Fe-nanoparticles (NPs)/ carbon fibers (CF)/epoxy resin (EP) based composites were designed and fabricated. The microwave absorbers Fe-NPs were prepared by the direct current (DC) arc-discharge plasma method and modified with silane coupling agent KH550. The reflection losses of composites were measured in the frequency range of 2-18 GHz and the effects of Fe-NPs, CF and the geometry feature of test plates on the microwave absorbing properties were investigated. Results show that reflection loss peaks appear at low frequency and the microwave absorbing properties are enhanced due to the addition of CF. With the increasing mass fraction of Fe-NPs the microwave dissipation increases and the reflection loss peaks move towards the low frequency. The concentration gradient of Fe-NPs in EP matrix was caused by gravity during the preparation process and it causes reflection loss differences between the two surfaces of a plate, which is beneficial for microwave to enter the composite plate and be absorbed by properly setting the plate.

KEY WORDS composite, reflection loss, Fe nanoparticles, carbon fiber

随着各种电子设备的发展电磁干扰问题愈来愈显著, 雷达技术的进步要求武器装备具有更好的隐身性能。因此电磁波屏蔽与吸收材料的研制越来越重要, 引起了严重的关注。电磁波吸收材料能最大

限度地吸收入射波并将其损耗, 分为涂覆型吸波材料和结构型吸波材料两大类。涂覆型吸波材料具有涂覆方便灵活、可调节和吸波性能好等优点, 但其耐候性差、易剥落, 需要繁重的后期维护。结构型吸波材料具有优异的吸波性能和很好的力学性能, 既可承载又可减小雷达散射截面(RCS), 并有质轻高强的优点^[1]。

梯度结构型吸波材料中的吸收剂呈梯度分布,

* 国家自然科学基金51271044、51331006、51171033资助。
2014年7月11日收到初稿; 2014年9月22日收到修改稿。
本文联系人: 董星龙, 教授

能更好地满足入射面阻抗匹配和实现较宽频段内对电磁波的吸收。Masahiro Itoh等^[2]分别以羰基铁、坡莫合金(Fe-47Ni)为吸收剂,用离心模具技术制备外径7.00 mm、内径3.04 mm的同轴样品,其吸收剂梯度分布具有比均匀分布更好的宽频吸波性能。李晓敏等^[3]以E-51环氧树脂为基体,以 $\text{Fe}_8\text{Si}_{13}\text{B}_9$ 粉体为吸收剂制备的梯度吸波复合材料板,当吸收剂与环氧树脂质量比为6:1时在2.7-18 GHz的反射损耗均小于-4 dB。管登高等^[4]制备的镍/镍锌铁氧体环氧树脂梯度电磁屏蔽材料,在频率低于1 GHz时对电磁波的反射损耗比非梯度材料平均降低了6-8 dB,而吸收损耗平均提高了6-14 dB。王智慧等^[5]以纳米铁酸镍钴铁氧体复合钴粉、羰基铁粉等为吸收剂,采用化学镀层方法制备出单层、双层和三层涂层吸波材料,发现双层复合涂层的吸波性能比单层涂层在低频段有较大的提高,三层复合涂层的吸波性能更加优异。

本文以磁性Fe纳米粒子作为微波吸波剂,应用纳米材料的小尺寸、高表面能、量子尺寸效应^[6]、以及磁性金属的高Snoke极限值^[7]、高磁导率等优异性能,制备Fe纳米粒子/碳纤维/环氧树脂基功能/结构一体化复合材料,研究其电磁波吸收性能与机理。Fe纳米粒子具有优异的电磁响应特性和吸波性能^[8],碳纤维对电磁波有强反射作用^[9]。

1 实验方法

1.1 Fe纳米粒子吸收剂的制备和表面改性

用直流电弧等离子体方法制备Fe纳米粒子微波

吸收剂^[8],以钨棒作为阴极,以放置在水冷铜座上的块体Fe料作为阳极。将生成室抽真空后通入0.02 MPa氩气和0.02 MPa氢气作为反应气体,直流电弧等离子体作为热源来蒸发Fe块制备出Fe纳米粒子。

用EMPYREAN型X射线衍射仪(XRD)测定纳米粉体的物相组成,Cu靶 $K_\alpha=0.154$ nm射线,管电压40 kV,获得 $20^\circ < 2\theta < 90^\circ$ 范围内样品衍射图谱。用TecnaiG220 S-Twin透射电子显微镜(TEM)观察纳米粒子的形貌。

用 γ -氨丙基三乙氧基硅烷(KH550)对Fe纳米粒子进行表面改性,步骤如下:将适量浓度为10%(质量分数)的KH550酒精溶液倒入盛有Fe纳米粒子的烧杯中,其 $m_{\text{Fe}}:m_{\text{KH550}}=20:1$ 。再向该烧杯中加入少量去离子水并滴加稀盐酸,使混合溶液的pH值为5,然后将其置于60℃水浴中超声震荡和机械搅拌60 min。再对混合溶液进行多次离心、水洗,直至混合物的pH值为7,最后将混合物放置于80℃的真空干燥箱中干燥12 h。

用FT/IR-430红外光谱仪(FITR)分析改性前后Fe纳米粒子及KH550的傅里叶红外吸收光谱,以确定改性效果。

1.2 平板状Fe纳米粒子/碳纤维/环氧树脂基复合材料制备

使用改性后的Fe纳米粒子,以120 g环氧树脂E51为基准,加入固化剂甲基六氢苯酐(MeHHPA)和促进剂(PPh₃),按照 $m_{\text{E51}}:m_{\text{MeHHPA}}:m_{\text{PPh3}}=100:80:1$ 比例,分别配制Fe纳米粒子质量分数为0%、20%、30%的混合溶液。按照图1所示的步骤,将内尺寸为20 cm×

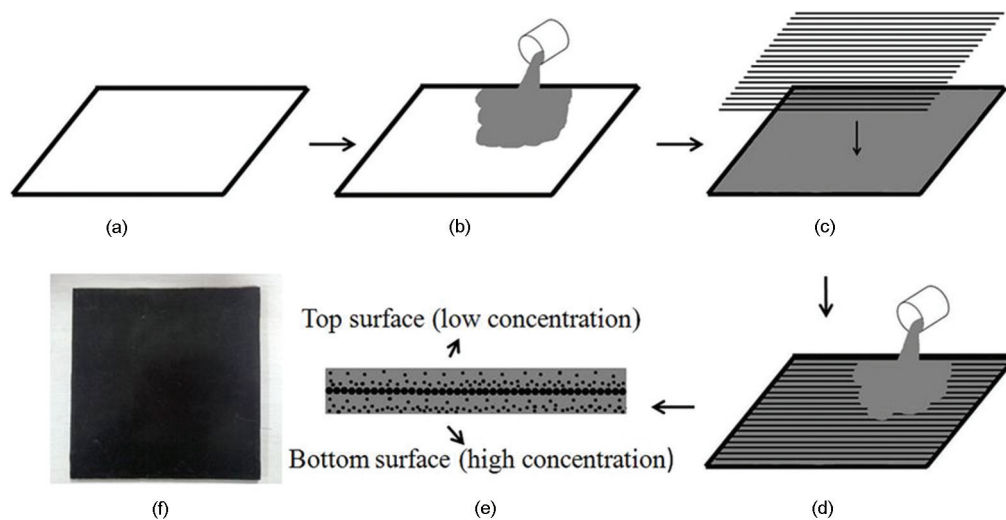


图1 平板状Fe纳米粒子/碳纤维/环氧树脂复合材料制备流程图

Fig.1 Preparation process chart of Fe NPs/carbon fiber/epoxy resin composite flat plate (a) preheating the mould at 110℃, (b) pouring the first layer of composite into the mould, (c) putting the carbon fabric, (d) pouring the second layer of composite into the mould, (e) diagrammatic cross-section of the flat plate, (f) as-prepared flat plate

20 cm的模具放在干燥箱中预热至110℃(图1a); 将一半混合溶液倒入模具中(图1b); 20 min后在模具中水平放置一张面积为20 cm×20 cm的单向碳纤维布(密度1.71 g/cm³, 线密度0.800 g/m), 并迅速倒入另一半混合树脂溶液(图1c和d); 按照110℃/0.5 h+123℃/1.5 h+134℃/2 h工艺条件固化混合树脂溶液。图1e为所制样品的剖面示意图, 图1f是真实样品俯视图。表1列出了不同Fe纳米粒子含量碳纤维/环氧树脂基复合板样品厚度。

为了对比碳纤维对复合材料板吸波性能的影响, 制备不添加碳纤维的复合材料板为参照样品。将在固化过程中复合材料板接触空气的一面称为正面, 对应Fe纳米粒子低浓度面; 接触模具的另一面称为反面, 对应Fe纳米粒子高浓度面。

用Nova NanoSEM 450场发射扫描电子显微镜(SEM)对复合材料的截面进行元素线扫描分析。

1.3 结构型纳米复合材料吸波性能的测试

按国标GJB2093-94, 用弓形反射法在2-18 GHz范围内测试标准尺寸20 cm×20 cm的复合材料的反射损耗, 测试系统为Agilent 8720B 矢量网络分析仪, 测试在微波暗室中进行。样品台周围及四周墙壁上铺设高效吸波角锥材料, 背景反射小于-40 dB。图2为弓形反射法测试系统示意图。为了对比电磁波分别由低浓度面和高浓度面入射时复合材料吸波性能的差异, 分别以正面和

表1 不同Fe纳米粒子含量碳纤维/环氧树脂基复合板样品厚度
Table 1 Thickness of Fe NPs/carbon fiber/epoxy resin composite flat plates with different Fe NPs content

Fe NPs content (mass fraction,%)	0%	20%	30%
Thickness/mm	4.01	4.36	4.73

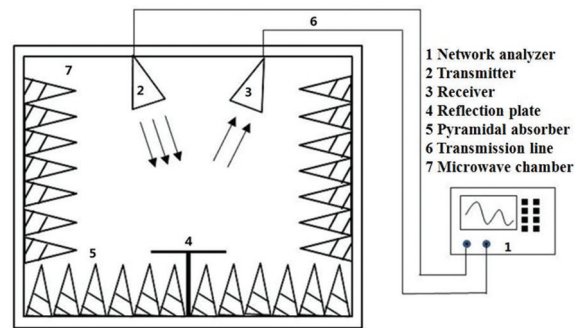


图2 弓形反射法测试系统示意图
Fig.2 Schematic diagram of the arch reflection testing system

反面作为入射面测试其反射损耗, 且保持碳纤维的方向一致。

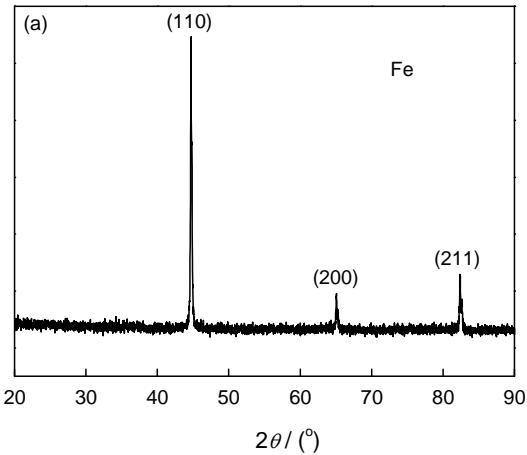
2 结果和讨论

2.1 Fe纳米粒子吸收剂结构和形貌

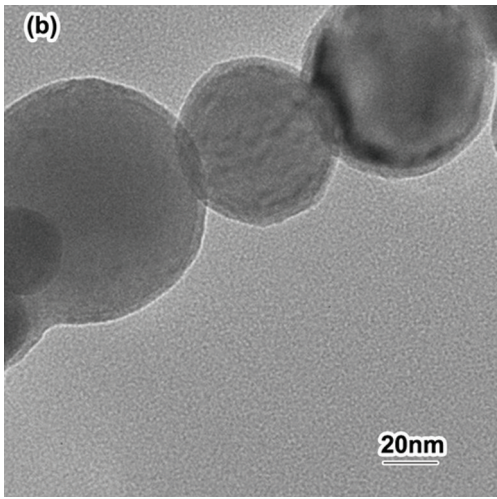
改性前Fe纳米粒子X射线衍射谱(图3a)中的三个主峰分别对应α-Fe(b.c.c)的标准衍射图谱, 其晶格常数为0.28664 nm。使用Scherrer公式 $D=0.9\lambda/\beta\cos\theta$ (其中, D 为粒径(nm), λ 为X射线的波长, β 为半峰宽, θ 为衍射角)计算出, Fe晶粒尺寸约为65.7 nm。从改性前Fe纳米粒子TEM照片(图3b)可见, Fe纳米粒子为球形, 且表面有一层几个纳米厚的氧化层。在制备过程为了降低Fe纳米粒子表面活性而进行钝化, 产生的氧化层较薄, 因此没有出现在XRD谱中。

2.2 Fe纳米粒子表面改性

纳米粒子的比表面积大、表面能高、粒子活性大, 极易团聚, 不易分散且与基体结合困难, 因此对



其进行表面改性。改性机制



如图4所示。改性后Fe纳米粒

图3 Fe纳米粒子XRD谱和TEM像
Fig.3 XRD pattern (a) and TEM image (b) of Fe NPs

子表面带有氨基官能团,氨基离子化后既保持了粒子间静电排斥作用,又提升了空间位阻作用,极大地提高了Fe纳米粒子的分散稳定性^[10]。

图5给出了表面改性剂KH550以及Fe纳米粒子改性前、后的红外光谱图。在 2970 cm^{-1} 附近的峰位对应甲基的不对称伸缩振动峰, 2920 cm^{-1} 和 2900 cm^{-1} 处分别是C-H的不对称伸缩振动峰和对称伸缩振动峰^[11]。 1390 cm^{-1} 处的峰对应C-Si-O^[12], 1050 cm^{-1} 处的峰可能是KH550与Fe纳米粒子表面羟基反应生成的Si-O-Fe。 1080 cm^{-1} 为Si-O-C的对称伸缩振动峰^[11]。从谱图可见,与改性前的Fe纳米粒子相比,在改性后的Fe纳米粒子红外谱图的 1050 cm^{-1} 、 1080 cm^{-1} 、 1390 cm^{-1} 和 2970 cm^{-1} 及其附近出现了新的振动峰,

(图6B)。这表明,改性后的Fe纳米粒子的分散性有了极大的提高。

2.3 成分分析

图7给出了含20%Fe纳米粒子复合材料的SEM测试结果,图7a为SEM线扫描区域,其上表面为正面。图中红线、绿线和蓝线分别代表C元素、O元素和Fe元素,其中C元素分布在碳纤维布的位置出现连续的峰值,而O元素均匀分布。图7b为Fe元素分布情况,可见自正面向内直至碳纤维,Fe元素浓度基本上逐渐增大。由于受到重力的作用,Fe纳米粒子在环氧树脂固化过程中发生自然沉降,最终在复合材料板中呈梯度分布。

2.4 平板状Fe纳米粒子/碳纤维/环氧树脂基复合材料

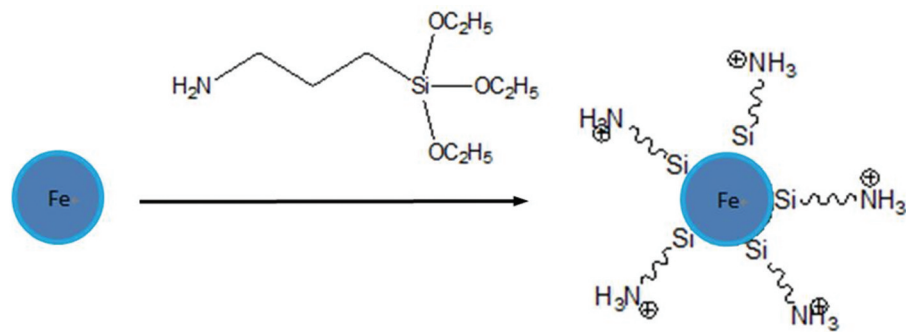


图4 KH550对Fe纳米粒子表面改性机制

Fig.4 Modification mechanism of Fe nanoparticles with KH550

与KH550的红外光谱作对比,表明KH550已经成功接枝到Fe纳米粒子表面。

为了直观地体现改性效果,分别将相同质量改性前后的Fe纳米粒子添加至盛有相同体积无水乙醇的小瓶A、B中。超声震荡20 min后静置,记录静置时纳米粒子的分散情况。图6给出了静置40 min时的照片截图,改性前的Fe纳米粒子已经明显沉降(图6A),而改性后的Fe纳米粒子仍然分散在乙醇中

料吸波性能

以复合材料板的正面即Fe纳米粒子低浓度面为入射面,测试其反射损耗,红色曲线与黑色曲线分别对应添加碳纤维与未添加碳纤维的复合材料板,图8a-c给出了Fe纳米粒子含量不同的复合平板的吸波性能测试结果。图8a中黑色曲线为没有添加Fe纳米粒子的环氧树脂板的反射损耗,可见其反射

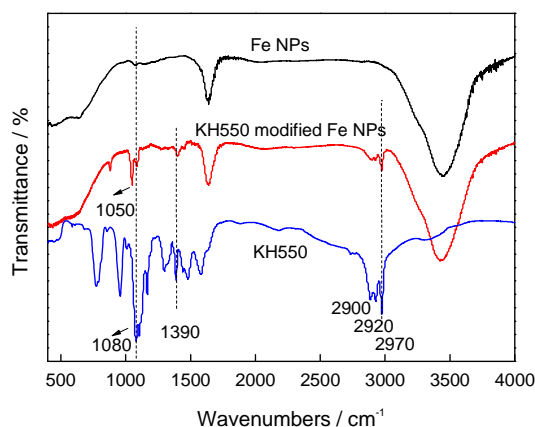


图5 Fe纳米粒子改性前后及KH550的红外光谱
Fig.5 FTIR of unmodified, modified Fe NPs and KH550

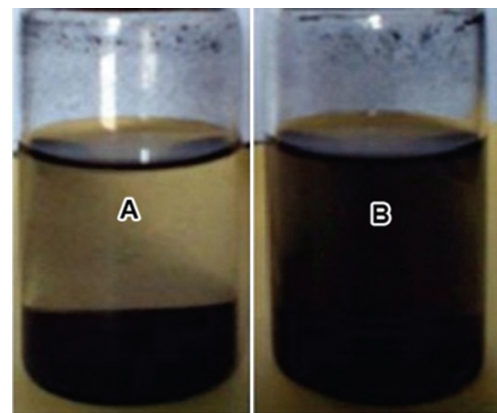


图6 改性前后Fe纳米粒子分散情况(A: 改性前, B: 改性后)

Fig.6 Dispersion states of Fe NPs in ethanol (A- unmodified, B-modified with KH550)

损耗值为0, 即环氧树脂对电磁波没有任何损耗, 是优良的透波材料; 而碳纤维/环氧树脂基复合材料板的反射损耗值基本上随着频率的增大而减小, 最小值大于-9 dB。可见碳纤维作为反射层同样对电磁波有一定的损耗能力, 且随频率增大而加强。含20%Fe纳米粒子的环氧树脂基复合板在高频有一定的吸波性能, 但是损耗能力不佳; Fe纳米粒子含量

随着Fe纳米粒子浓度的增大而向低频移动。这个结果, 与图8即正面反射规律一致。

对比图8a-c结果可知, 不加碳纤维的复合材料板其吸波能力与Fe纳米粒子含量密切相关, 随着Fe纳米粒子添加量的增加高频段的吸波能力提高。前期的研究表明, 随着Fe纳米粒子浓度的增加, Fe纳米粒子/石蜡复合样品的复介电常数和复磁导率的实部和虚部都有一定的增大^[13]。根据Bruggeman方程^[14], 随着Fe纳米粒子浓度的增大环氧树脂

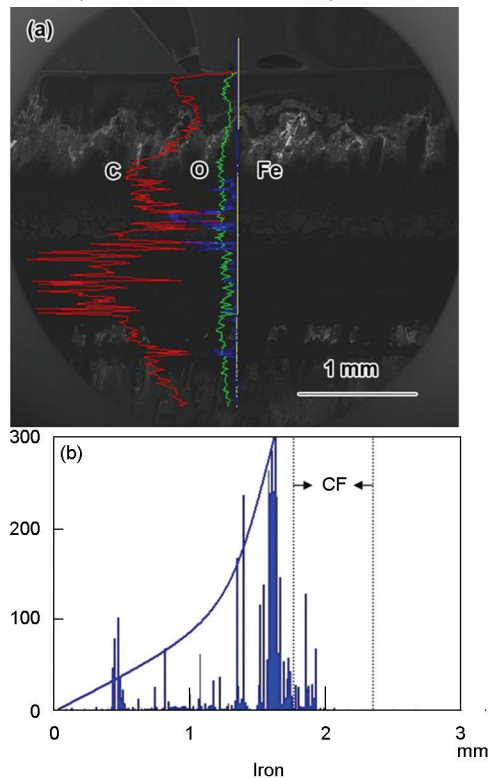


图7 Fe纳米粒子/碳纤维/环氧树脂基复合材料板截面中元素分布

Fig.7 Elements distribution in the cross-section of Fe NPs/carbon fiber/epoxy resin composite flat plates (a) area of SEM element line scan; (b) distribution of iron element

相同但添加了碳纤维的环氧树脂基复合板, 其反射损耗在8.2 GHz处出现了峰值, 最小值为-9.3 dB(图8b)。这一结果表明, 碳纤维的加入明显改变了复合平板的吸波频率特征, 吸收峰向低频方向移动, 吸收值没有大的改变。图8c表明, 含30%Fe纳米粒子的环氧树脂基复合板的吸波能力逐渐增强。添加碳纤维后其反射损耗在6 GHz处出现了峰值, 最小值为-17.3 dB, 吸波性能明显提高。

为了探究Fe纳米粒子浓度梯度对复合材料板吸波性能的影响, 以Fe纳米粒子/碳纤维/环氧树脂基复合材料板反面即Fe纳米粒子高浓度面为入射面, 测试其反射损耗, 并与正面反射损耗比较。图9表明, Fe纳米粒子/碳纤维/环氧树脂基复合材料板反面反射损耗在2-18 GHz均出现两个吸收峰, 峰值

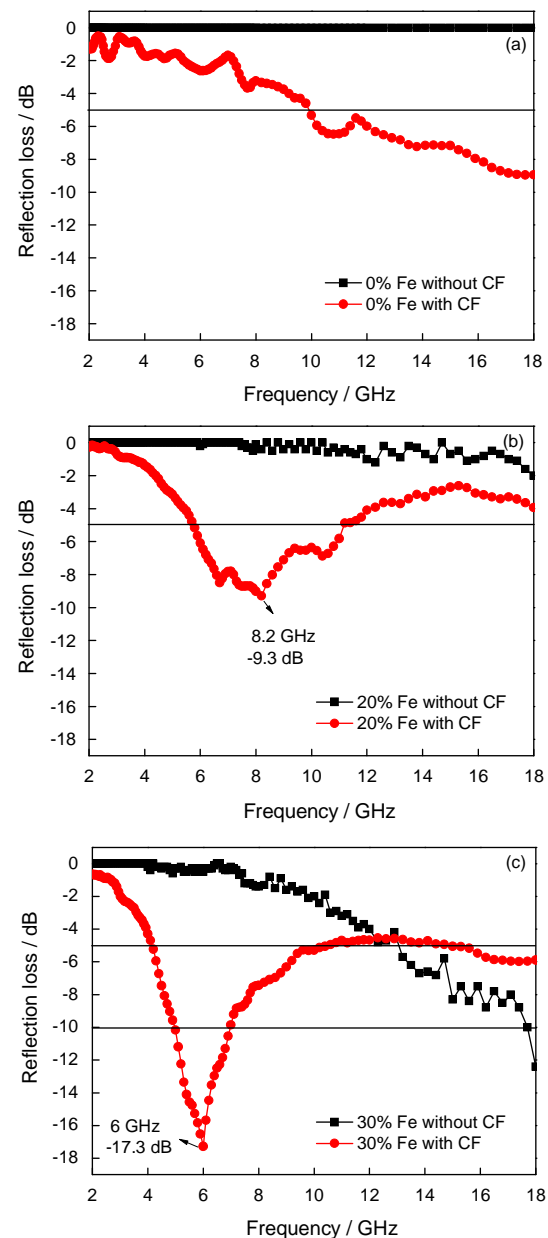


图8 不同Fe纳米粒子含量的复合材料板的正面反射损耗

Fig.8 Top surface reflection losses of composite flat plates with different Fe NPs content (a) 0% Fe; (b) 20% Fe; (c) 30% Fe

基复合材料板的复介电常数和复磁导率增大。当 Fe 纳米粒子浓度达到一定值时在环氧树脂中形成网络结构, 增强对电磁波的散射和反射, 加强复合材料对电磁波的吸收能力。而添加碳纤维后的复合材料板的吸波性能明显提高, 且峰值对应频率向低频移动。从图 8a 可知, 碳纤维对电磁波有一定的损耗能力, 且在复合材料板中碳纤维可以促进电磁波的多重反射, 提高了吸收剂的电磁吸收几率与损耗效

脂中, 其吸波性能很难有更大的提高, 而添加碳纤维可提高吸波性能。

表 2 列出了 Fe 纳米粒子/碳纤维/环氧树脂基复合材料板正、反面的反射损耗值及其对应的波段范围。可见复合材料板反面在较大频率范围内反射损耗值均小于 -5dB 即微波吸收率大于 68.4%。其中含 20%Fe 纳米粒子的复合材料板的频率范围为 4.3~8.6 GHz 和 13.5~18 GHz, 分别对应 C 波段和 K_u 波

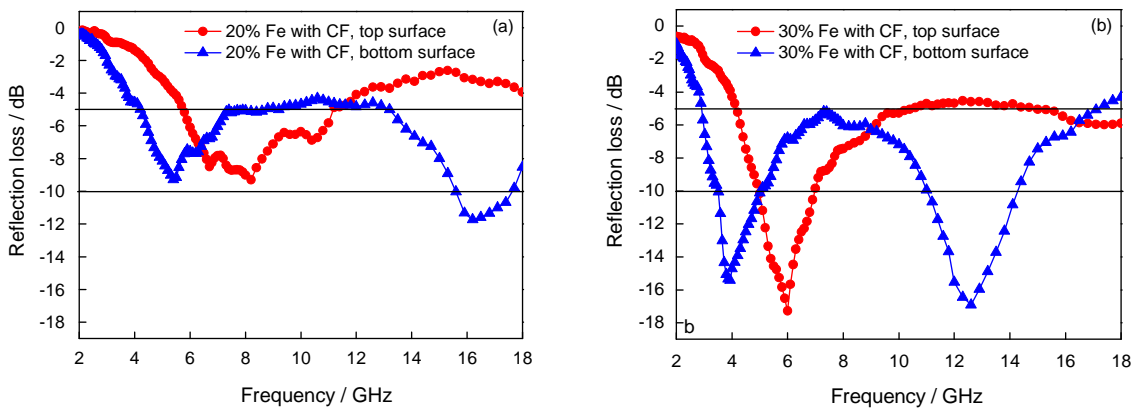


图9 不同Fe含量的复合材料板的正面、反面反射损耗
Fig.9 Top and bottom surface reflection losses of composite flat plates with different Fe NPs content (a) 20% Fe; (b) 30% Fe

表2 反射损耗值对应的频率范围

Table 2 Microwave frequency ranges for the reflection losses below than -5 GHz and -10 GHz

Samples	< -5dB	< -10dB
20% Fe with CF top surface	5.8~11 GHz	-
20% Fe with CF reverse surface	4.3~8.6 GHz 13.5~18 GHz	15.6~17.6 GHz
30% Fe with CF top surface	4.2~10.4 GHz 15~18 GHz	5~6.9 GHz
30% Fe with CF reverse surface	2.9~17.1 GHz	11.2~14.2 GHz

率。根据公式 $f_m = nc / (4t_m \sqrt{|\epsilon_r| |\mu_r|})$, ($n=1, 3, 5, 7, 9, \dots$, 其中 f_m 为匹配频率, t_m 为匹配厚度, c 为真空中光速, ϵ_r 和 μ_r 分别代表样品的相对介电常数和相对磁导率), 吸收频率的大小受电磁参数和平板厚度的影响。根据 Bruggeman 方程^[14], 随着 Fe 纳米粒子含量的提高其碳纤维/环氧树脂复合材料的相对介电常数和相对磁导率将逐渐增大。这是复合材料的吸收频率随着吸收剂含量提高而向低频移动的主要原因; 表 1 列出了 Fe 纳米粒子含量不同的碳纤维/环氧树脂基复合板样品厚度, 可见等量环氧树脂复合板的厚度随着吸收剂含量的增大而变厚, 这是低频移动的次要原因。通过对比还可以发现, 由于难以加入更大比例的 Fe 纳米粒子, 单纯添加 Fe 纳米粒子到环氧树

脂中, 其吸波性能很难有更大的提高, 而添加碳纤维可提高吸波性能。而含 30%Fe 纳米粒子的复合材料板的频率范围为 2.9~17.1 GHz, 包括了 C 波段、X 波段和 S 波段与 K_u 波段的大部分, 基本覆盖了全波段。这表明以 Fe 纳米粒子高浓度面作为入射面, 其吸波性能更佳。30%Fe 纳米粒子的复合材料板其正面、反面反射损耗曲线差异更大, 因为 Fe 纳米粒子浓度较大时重力作用造成更大的浓度分布梯度。

3 结 论

1. 经 KH550 改性后, Fe 纳米粒子的分散性有了很大的提高。
2. 未添加碳纤维布的 Fe 纳米粒子/环氧树脂基复合板的吸波性能不佳, 随着 Fe 纳米粒子含量的增大在高频段吸波性能有所提高。

chinaXiv:202303.00332v1

3. 加入碳纤维布后Fe纳米粒子/碳纤维/环氧树脂基复合板在低频出现吸波峰, 吸波能力有了很大提高。在Fe纳米粒子与碳纤维共存体系中碳纤维可促进电磁波的多重反射, 提高吸收剂的电磁吸收几率与损耗效率, 其中30%Fe纳米粒子复合材料板在6 GHz处吸收率大于98%。低频性能的提高源于吸收剂含量的提高, 及相应复合板厚度的增大。

4. 在Fe纳米粒子/碳纤维/环氧树脂基复合材料中, 吸收剂浓度梯度分布是影响吸波性能的重要因素。

参考文献

- LIU Shunhua, LIU Junmin, DONG Xinglong, *Electromagnetic Shielding and Absorbing Materials* (Beijing, Chemical Industry Press, 2006)p.255
(刘顺华, 刘军民, 董星龙, 电磁波屏蔽及吸波材料(北京, 化学工业出版社, 2006)p.255)
- I. Masahiro, T. Masao, S. Fumiyoshi, M.Ken-ichi, Broadband electromagnetic wave absorbers prepared by grading magnetic powder density, *Journal of Applied Physics*, **108**, 063911(2010)
- LI Xiaomin, ZHU Zhenghou, ZHENG Xialian, LIU Jilei, HUO Jia, Study on the SMC molding technology and absorbing properties of new-type absorbing composite, *Journal of Functional Materials*, **3** (44), 337(2013)
(李晓敏, 朱正吼, 郑夏莲, 刘吉磊, 霍佳, 新型吸波复合材料的SMC成型工艺及吸波性能研究, *功能材料*, **3**(44), 337(2013))
- GUAN Denggao, HUANG Wanxia, MAO Jian, JIANG Yu, CHEN Jiazhao, TU Mingjing, Study on shielding functionally gradient materials with lower reflection loss and high absorption loss for electromagnetic wave, *Journal of Functional Materials*, **6**(34), 676(2003)
(管登高, 黄婉霞, 毛键, 蒋渝, 陈家钊, 涂铭旌, 低反射高吸收梯度电磁波屏蔽复合材料研究, *功能材料*, **6**(34), 676(2003))
- WANG Zhihui, LUO Wu, XIA Zhidong, HU Chuanxin, Study on multilayer radar wave absorbing coatings, *Ordnance Material Science and Engineering*, **29**(1), 61(2006)
(王智慧, 骆武, 夏志东, 胡传忻, 化学镀层与涂层复合多层结构雷达波吸收性能研究, *兵器材料科学与工程*, **29**(1), 61(2006))
- CAO Guozhong, WANG Yingzhu, Translated by DONG Xinglong, *Nanostructures and Nanomaterials: Synthesis, Properties and Applications* (Beijing, Higher Education Press, 2012)p.14, p.329
(曹国忠, 王颖著, 董星龙译, 纳米结构和纳米材料: 合成、性能及应用(北京, 高等教育出版社, 2012)p.14, p.329)
- J. L. Snoke, *New Developments in Ferro- magnetic Materials* (Amsterdam, Elsevier, 1947)p.25
- B. Lv, X. L. Dong, H. Huang, X. F. Zhang, X. G. Zhu, J. P. Lei, J. P. Sun, Microwave absorption properties of the core/shell-type iron and nickel nanoparticles, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **320**, 1106(2008)
- C. K. Po, G. L. Dai, Composite sandwich constructions for absorbing the electromagnetic waves, *Composite Structures*, **87**, 161(2009)
- MA Chengyin, WU Yuanxiong, TANG Pingsheng, MENG Jie, Preparation and surface modification of nano-SnO₂, *Chinese Journal of Applied Chemistry*, **26**(2), 198(2009)
(马承银, 吴元雄, 唐平生, 孟杰, SnO₂纳米粒子的制备与表面改性, *应用化学*, **26**(2), 198(2009))
- I. J. Bruce, T. Sen, Surface modification of magnetic nanoparticles with alkoxysilanes and their application in magnetic bioseparations, *Langmuir*, **21**, 7029(2005)
- B. G. Wei, Q. Chang, C. X. Bao, L. Dai, G. Z. Zhang, F. P. Wu, Surface modification of filter medium particles with silane coupling agent KH550, *Colloids and Surfaces A, Physicochem. Eng. Aspects*, **434**, 276(2013)
- SHI Mengshi, The Fabrication and Properties of Fe/epoxy Nanocomposites, Master Dissertation, Dalian University of Technology (2012)
(石梦诗, 铁纳米粒子/环氧树脂复合材料的制备及性能分析, 硕士学位论文, 大连理工大学(2012))
- A. Berthault, D. Rousselle, G. Zerah, Magnetic properties of permalloy microparticles, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **112**, 477(1992)